

**ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИЕ СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ *IN SITU* И
ON-SITE ОЦЕНКИ АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ
POTENTIOMETRIC SENSOR SYSTEMS FOR *IN SITU* AND *ON-SITE*
EVALUATION OF THE ANTIOXIDANT ACTIVITY**

Аннотация: в статье обобщены результаты разработки потенциометрических сенсорных систем (ПСС) на основе хлорид/феррицианидсеребряного электрода сравнения, предназначенных для оценки антиоксидантной активности (АОА) пищевых продуктов и кожи человека в режиме реального времени (*in situ*). В комплекте с потенциометрическим анализатором портативного или карманного типа разработанные ПСС могут быть использованы во внелабораторном анализе (*on-site*).

Abstract: the article summarizes the results of the development of potentiometric sensor systems (PSSs) based on silver chloride/ferricyanide reference electrode, designed to assess the antioxidant activity (AOA) of food products and human skin in real-time mode (*in situ*). Together with a portable or pocket-type potentiometric analyzer, the developed PSSs can be used in extralaboratory analysis (*on-site*).

Ключевые слова: антиоксидантная активность, потенциометрическая сенсорная система, электрод сравнения, внелабораторный анализ, полевой анализ.

Keywords: antioxidant activity, potentiometric sensor system, reference electrode, extralaboratory analysis, field analysis.

Развитие редокс-биологии послужило представлению о том, что изменение клеточного окислительно-восстановительного гомеостаза сопровождается нарушением клеточного метаболизма и развитием окислительного стресса. Повышенный уровень окислительного стресса связан с около 200 заболеваниями человека [4]. В настоящее время "человечество стоит на пороге значительного увеличения продолжительности биологически активной жизни, и во многом это будет достигнуто с помощью профилактических мероприятий, направленных на регуляцию радикальных окислительных процессов" [7, с. 202]. Выпускаемые промышленностью антиоксидант-содержащие пищевые, фармацевтические и косметические продукты широко используются человеком для регуляции (модуляции) клеточных окислительно-восстановительных процессов. Это позволяет говорить о большом

прикладном значении мониторинга антиоксидантной активности (АОА). Ю.А. Золотов с соавторами определяют одно из направлений развития современного химического анализа следующим образом: "химический анализ перемещается из лаборатории к тем местам, где находятся объекты анализа" [6, с. 7]. Лабораторные методы определения АОА, использующие экстракцию и/или фракционирование в качестве этапа предварительной подготовки образцов, решают большой спектр аналитических задач, но являются трудоемкими и бесперспективными для удаленного и мобильного мониторинга. Существующий разрыв между лабораторным и внелабораторным анализом призваны сократить аналитические методы и сенсоры, предназначенные для оценки АОА в режиме реального времени (*in situ*). Эти методы и сенсоры примечательны тем, что они характеризуются отсутствием предварительной подготовки образцов, а в сочетании с измерительным оборудованием портативного или карманного типа могут быть использованы во внелабораторных (полевых) условиях (*on-site*).

В результате исследований, выполненных на базе Научно-инновационного центра сенсорных технологий Уральского государственного экономического университета в период 2018–2021 годов, были разработаны хлорид/феррицианидсеребряный электрод сравнения [3] и потенциометрические сенсорные системы (ПСС) на его основе [1, 2, 5, 8]. Новый электрод сравнения представляет собой серебряный screen-printed электрод, на поверхности которого в потенциостатическом режиме сформирован осадок, содержащий смесь хлорида и феррицианида серебра. В отличие от обычного хлоридсеребряного электрода разработанный электрод обладает стабильным потенциалом в содержащей $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$ среде (растворе и полимерной мембране), что позволяет использовать его для создания опорного потенциала в процессе потенциометрической оценки АОА. Планарная конструкция электрода позволяет эксплуатировать его как в вертикальном (анализ жидких образцов), так и в горизонтальном (анализ твердофазных образцов) положениях. Разработанный электрод сравнения был использован в составе трех ПСС, которые отличаются типом инертной подложки и природой индикаторного электрода. Алюмооксидная керамика [1, 3] и стеклотекстолит [2, 8] были использованы при создании жестких ПСС, а полимерная пленка на основе полиэтилентерефталата была использована при создании гибкой ПСС [5]. Разработанные ПСС были успешно применены для *in situ* оценки АОА пищевых продуктов [1, 8] и кожи человека [2, 5]. Основные результаты исследований резюмированы в таблице 1. При изготовлении электродов ПСС использовались масштабируемые технологии и недорогие доступные материалы, что предполагает их быстрое прототипирование и одноразовое использование. Отсутствие предварительной подготовки электродов к выполнению

измерений позволяет прогнозировать применение ПСС неквалифицированным персоналом вне лаборатории.

Таблица 1. ПСС для *in situ* оценки АОО пищевых продуктов и кожи человека.

| Структура ПСС* | Объект анализа | Практическая значимость | Источ-ник |
|--|----------------|--|-----------|
| AuHЧ/С/СТ, ХСФС/Ag/СТ | Напитки | Анализ коммерческих напитков без предварительного разбавления и дегазации | [8] |
| Pt/АК, ХСФС/Ag/АК и мембрана, содержащая $[Fe(CN)_6]^{3-/4-}$ | Фрукты, овощи | Анализ срезов фруктов и овощей без предварительного измельчения и экстракции | [1] |
| AuHЧ/С/СТ, ХСФС/Ag/СТ и мембрана, содержащая $[Fe(CN)_6]^{3-/4-}$ | Кожа человека | Анализ кожи человека без пробоотбора и пробоподготовки (экстракции); снижение риска инфицирования респондента в результате неинвазивной процедуры анализа; возможность оценки эффективности антиоксидант-содержащих продуктов перорального (БАДы) и наружного (косметика) применения | [2, 5] |
| УВ/ПЭТ, ХСФС/Ag/ПЭТ и мембрана, содержащая $[Fe(CN)_6]^{3-/4-}$ | | | |

*AuHЧ/С/СТ: углеродный *screen-printed* электрод на основе стеклотекстолита, модифицированный наночастицами коллоидного золота; ХСФС/Ag/СТ: серебряный *screen-printed* электрод на основе стеклотекстолита, модифицированный хлоридом и феррицианидом серебра; Pt/АК: платиновый *screen-printed* электрод на основе алюмооксидной керамики; ХСФС/Ag/АК: серебряный *screen-printed* электрод на основе алюмооксидной керамики, модифицированный хлоридом и феррицианидом серебра; УВ/ПЭТ: электрод на основе углеродной вуали и полиэтилентерефталата; ХСФС/Ag/ПЭТ: серебряный *screen-printed* электрод на основе полиэтилентерефталата, модифицированный хлоридом и феррицианидом серебра.

Благодарности

Автор выражает благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований (РФФИ) за финансирование исследования по разработке электрода сравнения на основе хлорида и феррицианида серебра (проект № 18-33-00215 мол_a).

Список литературы

1. Contact hybrid potentiometric method for on-site and *in situ* estimation of the antioxidant activity of fruits and vegetables / Kh. Brainina, A. Tarasov, E. Khamzina, N. Stozhko, M. Vidrevich // Food Chemistry. 2020. Vol. 309. Art.125703. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125703>.
2. Disposable potentiometric sensory system for skin antioxidant activity evaluation / Kh. Brainina, A. Tarasov, E. Khamzina, Ya. Kazakov, N. Stozhko // Sensors. 2019. Vol. 19, iss. 11. Art. 2586. <https://doi.org/10.3390/s19112586>.

3. Brainina Kh. Z., Tarasov A. V., Vidrevich M. B. Silver chloride/ferricyanide-based quasi-reference electrode for potentiometric sensing applications // *Chemosensors*. 2020. Vol. 8, iss. 1. Art.15. <https://doi.org/10.3390/chemosensors8010015>.

4. Oxidative stress in health and disease: The therapeutic potential of Nrf2 activation / B. M. Hybertson, B. Gao, S. K. Bose, J. M. McCord // *Molecular Aspects of Medicine*. 2011. Vol. 32, iss. 4–6. P. 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.mam.2011.10.006>.

5. Flexible potentiometric sensor system for non-invasive determination of antioxidant activity of human skin: Application for evaluating the effectiveness of phytocosmetic products / A. V. Tarasov, E. I. Khamzina, M. A. Bukharinova, N. Yu. Stozhko // *Chemosensors*. 2021. Vol. 9, iss. 4. Art. 76.

6. Золотов Ю. А. Иванов В. М., Амелин В. Г. Химические тест-методы анализа. М. : Едиториал УРСС, 2002. 304 с.

7. Окислительный стресс: Патологические состояния и заболевания / Е. Б. Меньшикова, Н. К. Зенков, В. З. Ланкин, И. А. Бондарь, В. А. Труфакин. Новосибирск : АРТА, 2008. 284 с.

8. Тарасов А. В., Чугунова О. В., Стожко Н. Ю. Потенциометрическая сенсорная система на основе модифицированных толстопленочных электродов для определения антиоксидантной активности напитков // *Индустрия питания*. 2020. Т. 5, № 3. С. 85–96.